УДК 624.012.4.044.046.3

ПРО МІРУ ПЛАСТИЧНОСТІ БЕТОНУ

О МЕРЕ ПЛАСТИЧНОСТІ БЕТОНА

ABOUT THE MEASURE OF THE PLASTICITY OF CONCRETE

Довженко О.О., к.т.н., доц., Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Довженко О.А., к.т.н., доц., Погребной В.В., к.т.н., с.н.с. (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава)

Dovzhenko O.A., candidate of technical sciences, docent, Pogribnoy V.V., candidate of technical sciences, senior researcher (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava)

Запропоновано міру пластичності бетону визначати як відношення висоти стиснутої зони на стадії руйнування до її висоти на пружній стадії роботи короткого елемента при згинанні. Встановлена межа застосування теорії пластичності для розрахунку бетонних елементів за міцністю.

Предложено меру пластичности бетона определять как отношение высоты сжатой зоны на стадии разрушения к ее высоте на упругой стадии работы изгибаемого короткого элемента. Установлена граница применимости теории пластичности для расчета бетонных элементов на прочность.

The concrete's measure of the plasticity it is proposed to determite as a ratio of compressed zone height at the state of the failure of short beanding element to it's height at the elastic state work. The limit of applicability of the plasticity theory is set to design the strength of concrete element.

Ключові слова:
Бетон, стиск, пластичність, елемент, міцність.
Бетон, сжатие, пластичность, элемент, прочность.
Concrete, compression, plasticity, element, strength.

Стан питання. Одним із основних напрямів удосконалення розрахунків конструкцій є створення достатньо загальних теоретично обґрунтованих

методик на основі механіки твердого деформівного тіла. Для оцінювання міцності бетонних і залізобетонних елементів найбільш перспективними вважаються механіка крихкого руйнування [1] та теорія пластичності [2 – 6]. Перша описує поведінку елементів за їх квазіпружної роботи, друга – у граничному стані за визначального впливу пластичних властивостей бетону.

Вибір однієї із них пов'язаний із оцінюванням домінуючого впливу пружної або пластичної складових деформації у зоні руйнування, котре характеризується показником їх співвідношення. Інтенсивність деформацій також визначає форму руйнування. Так, у разі коли бетон залишається малодеформованим, відбувається відрив – віддалення окремих частин елемента в напрямку, перпендикулярному до поверхні руйнування; за наявністю областей пластичності має місце роздроблення бетону в результаті прояву деформації стиснення; а при локалізації спрямованої пластичної деформації у тонкому шарі на поверхні руйнування реалізується проміжна форма у вигляді зрізу (зсуву) – переміщення окремих малодеформованих частин уздовж поверхні руйнування. При цьому для реалізації останньої обов'язковою умовою є наявність інтенсивної спрямованої деформації.

Таким чином, сама картина руйнування елемента якісно обґрунтовує можливість застосування того чи іншого розрахункового апарату.

Слід зазначити, що всі будівельні матеріали в тій чи іншій мірі проявляють пластичні властивості при певних напружених станах, але зі збільшенням різниці між їх опорами стиску f_c та розтягу f_{ct} інтервал цих станів звужується і межа між зсувною та відривною формами руйнування переміщується в напрямку одновісного стиску.

Для оцінювання пластичних властивостей бетону зазвичай використовується залежність між напруженнями та деформаціями при одновісних стиску й розтягу і визначається коефіцієнт пластичності $\lambda = \varepsilon_{\ddot{i}pl} / \varepsilon_{cu1}$, де $\varepsilon_{\ddot{i}pl}$ і ε_{cu1} – відповідно пластичні та повні деформації бетону. Але на діаграму механічного стану бетону суттєво впливає швидкість деформування, режим передачі навантаження та цілий ряд інших факторів, значення котрих досить важко встановити, особливо для конструкцій, що експлуатуються. Тому, в якості першого наближення, міру пластичності бетону пропонується розглянути як показник повноти інтервалу напружень, при яких реалізується зріз.

Запропонований показник визначає межу застосування теорії пластичності й механіки крихкого руйнування за відношеннями f_c і f_{ct}, як таких, що однозначно встановлені, та величини відносної висоти стиснутої зони в момент руйнування елемента при згині ξ_u до її величини на початку роботи (стадії I) $\xi_{el} = 0,5$.

Мета та задачі досліджень – визначення міри пластичності бетону та встановлення інтервалу напружень, за яких реалізується зріз і застосовується теорія пластичності для розрахунку міцності бетонних елементів.

Результати досліджень. Розглянемо защемлену з одного боку бетонну пластинку при поперечному згині.

Обов'язковою умовою локалізації пластичної деформації в області руйнування є випереджаючий рівень напружень у зоні стиску порівняно із зоною розтягу.

За визначального впливу на міцність згинального моменту, що характерно для довгих елементів, їх руйнування відбувається у формі відриву шляхом лавиноподібного зростання магістральної тріщини. При цьому рівень напружень у зони розтягу випереджає рівень напружень у зоні стиску й останні не досягають граничних значень.

Із зменшенням величини відношення згинального моменту M до поперечної сили V (для коротких елементів) напруження в стиснутій зоні наближаються і при певній величині M/Vh (де h – висота елемента) досягають граничних значень. Це перешкоджає розвитку магістральної тріщини і перетворенню тіла в механізм, а руйнування відбувається у формі зсуву. При цьому значення M/Vh відповідає межі між зрізовою та відривною формами руйнування і визначає мінімальну величину міри пластичності, при який наявна інтенсивність деформації створює умови реалізації зрізової форми руйнування. Для встановлення міри пластичності пропонується застосувати відношення величин стиснутої зони бетону на стадії руйнування ξ_u та початковій стадії роботи ξ_{el}

$$\mu_{pl} = \xi_u / \xi_{el}. \tag{1}$$

Так для сталі вказане відношення буде дорівнювати 1, а для менш пластичних матеріалів значно знижується за рахунок зменшується величина стиснутої зони зі збільшенням навантаження.

При рівномірному розподілі напружень у зонах розтягу та стиску, котрі досягають значень відповідно f_{ct} і f_c, відносна висота стиснутої зони дорівнює

$$\xi = f_{ct} / (f_c + f_{ct}). \tag{2}$$

Приймаючи в стиснутій зоні криволінійну епюру з низхідною гілкою та найбільшими напруженнями σ_c в середній її частині, як таку, що більш точно відповідає фактичному розподілу напружень в коротких елементах (рис. 1), та з врахуванням коефіцієнта повноти епюри, висоту стиснутої зони на стадії руйнування можливо визначити як

$$\xi_u = \xi / \omega. \tag{3}$$

Тоді за характерних для бетону відношень опо рів стиску та розтягу маємо: при $f_{ct} / f_c = 0{,}13$ і $\omega = 0{,}8$ – $\xi = 0{,}115$, $\xi_u = 0{,}144$, $\mu_{pl} = 0{,}288$; при $f_{ct} / f_c = 0{,}1$ і $\omega = 0{,}75$ – $\xi = 0{,}091$, $\xi_u = 0{,}121$, $\mu_{pl} = 0{,}242$; при $f_{ct} / f_c = 0{,}07$ і $\omega = 0{,}7$ – $\xi = 0{,}065$, $\xi_u = 0{,}093$, $\mu_{pl} = 0{,}186$.

Аналогічні результати щодо розподілу напружень (рис. 1) і розмірів зон стиску x та розтягу отримані при розв'язанні варіаційним методом [5, 7] задачі міцності бетонної шпонки при $l_k/h_k = 0{,}5$ [8], котра руйнується шляхом зрізу за цілим перерізом, наближеним до нормального.

Для використання отриманих вище результатів розглянемо в якості критерію міцності бетону умову Баландіна – Генієва [2], яка в координатах головних напружень σ_1, σ_2 представляє собою еліпс (рис. 2) та узагальнює на бетон класичну умову енергії формозмінення Мізеса – Генки. Вона базується на енергетичних критеріях порушення міцності та має гіперболічні ділянки інтервалів напружених станів між точками максимальних напружень стиску та розтягу, які характеризуються реально існуючою парою площин ковзання й зрізовою формою руйнування.

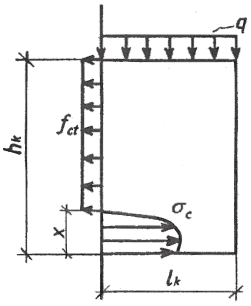

Рис. 1. Розподіл напружень нормальному перерізі бетонного елемента на межі руйнування від відриву та зрізу

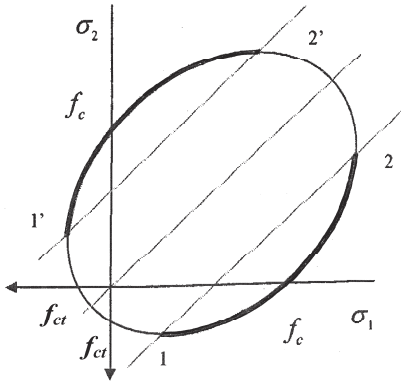

Рис. 2. Умова міцності бетону Баландіна – Генієва: 1 і 1' – точки найбільших напружень розтягу; 2 і 2' – точки максимальних напружень стиску; 1-2, 1'-2' – ділянки реально існуючих площин ковзання

Для вказаної вище умови міцності бетону координата максимальних головних напружень розтягу, яка для пластичних матеріалів слугує межею зсувної форми руйнування, становить

$$\sigma_{2,\max} = f_{ct} + \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2} - f_c \,. \qquad (4)$$

Область реалізації зрізової форми руйнування бетону обмежуються величиною напружень розтягу

$$\sigma_2 = \mu_{pl}\sigma_{2,\max} = \mu_{pl}\left(f_{ct} + \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2} - f_c \right), \qquad (5)$$

при цьому μ_{pl} визначає повноту розповсюдження ділянки напружених станів для бетонів різної міцності. Так при $f_{ct}/f_c = 0,07$ маємо $\sigma_2/f_c = 0,035$; при $f_{ct}/f_c = 0,1$ – $\sigma_2/f_c = 0,049$; при $f_{ct}/f_c = 0,13$ – $\sigma_2/f_c = 0,062$ (рис. 3). Для сталевої пластини ($f_{ct}/f_c = 1$) значення максимальних напружень дорівнює $\sigma_{2,\max}/\sigma_{ó} = 2/\sqrt{3}$.

Аналогічні результати були отримані на основі теорії ідеальної пластичності бетону та аналізу параметрів визначальних напружених станів прийнятої умови міцності, котра розглядалася як умова пластичності [7, 8].

Вказане обмеження в області змішаних напружених станів також підтверджується результатами розв'язанням задачі міцності бетонних пластин при місцевому стисненні (рис. 4).

Зі збільшенням відношення l_{loc}/h зона розтягу зменшується. При її відсутності, тобто неможливості реалізації відривної форми руйнування, визначені граничні величини напружень, які відповідають наведеним вище значенням.

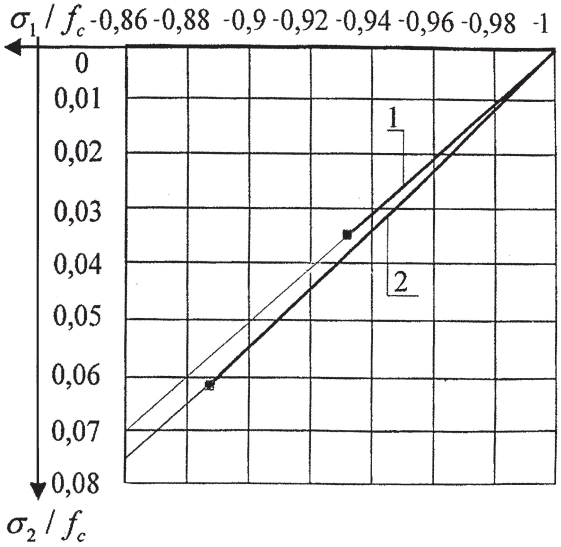

Рис. 3. Межа реалізації зрізової форми руйнування в області змішаних напружених станів:
1 – при $f_{ct}/f_c = 0,07$; 2 – $f_{ct}/f_c = 0,13$;
◆— – ділянки напружених станів, за яких реалізується зрізова форма руйнування

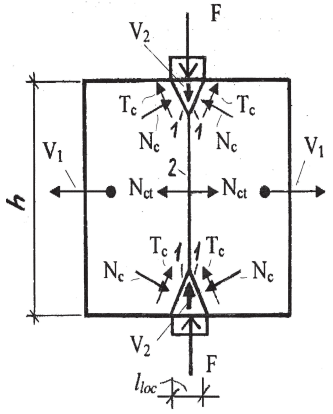

Рис. 4. Кінематична схема руйнування бетонного елемента при зсуві-відриві: 1 і 2 – зони стиску і розтягу; T_c, N_c і N_{ct} – зусилля, які сприймає бетон; V_1 і V_2 – швидкості руху дисків, розділених поверхнею руйнування

Крім того, зсувна форма руйнування спостерігається і при випробуваннях на одновісний стиск призм, виготовлених із високоміцного менш пластичного бетону [9], що вказує на зміщення межі зсувної форми у зону змішаних напружених станів щонайменше для більш пластичних бетонів нижчої міцності.

Висновки

1. Міру пластичності бетону пропонується визначати як відношення висоти стиснутої зони на стадії руйнування до її висоти на пружній стадії роботи коротких бетонних елементів при згинанні $\mu_{pl} = \xi_u / \xi_{el}$.

2. Міра пластичності дозволяє оцінити повноту інтервалу напружених станів, при яких реалізується зріз.

3. Область зрізової форми руйнування бетону в зоні змішаних напружених станів та застосування теорії пластичності обмежується напруженнями розтягу $\sigma_2 = \mu_{pl}\left(f_{ct} + \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{f_c^2 - f_c f_{ct} + f_{ct}^2} - f_c \right)$.

4. Отримані результати знайшли теоретичне підтвердження при розв'язанні задач міцності бетонних елементів варіаційним методом у теорії пластичності.

1. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей / Ю.В. Зайцев. – М.: Высшая школа, 1987. – 288 с. **2.** Гениев Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с. **3.** Качанов Л. М. Основы теории пластичности / А. М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с. **4.** Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с. **5.** Митрофанов В.П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование / В.П. Митрофанов // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. – К.: Техника. – Вып. 72. – 2006. – С. 6–26. **6.** Ржаницын А.Р. Приближенные решения задач теории пластичности / А. Р. Ржаницын // Исследования по вопросам строительной механики и теории пластичности: сб. ст. ЦНИПС – М .: Госстройиздат, 1956. – С. 8 – 65. **7.** Довженко О.О. До питання визначення межі реалізації зсувної форми руйнування бетонних елементів / О.О. Довженко, В.В. Погрібний // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Вип. № 47. – Ч.1. – Одеса: 2012. – С. 406 – 417. **8.** Довженко О.О. Методика розрахунку стикових з'єднань збірно-монолітних конструктивних систем під доступне житло в Україні / О.О. Довженко, В.В. Погрібний, Л.В. Карабаш, А.О. Бігдан, Н.В. Дакало // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний техн. ун-т імені Юрія Кондратюка. – Вип. 4 (39). – Том. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – С. 94 – 105. **9.** Сытник В.И. Экспериментальные исследования прочности и деформативности высопрочных бетонов / В.И. Сытник, Ю.А. Иванов // Высопрочные бетоны. – К.: Будівельник. – С. 54 – 72.